

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.023

基于RVA阈值区间集成的河道内生态需水计算与应用

武连洲^{1,2}, 白涛³, 黄强³

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

3. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要:在对河道生态需水特点进行分析和总结的基础上,提出了基于变化范围法和多种水文学法计算成果的河道内生态需水计算方法——下包线法,建立了考虑径流资料精度的评价体系。结合一致性审查、河道内生态需水计算和评价,构建了考虑径流非一致性的河道内生态需水计算框架,并应用于陕西省引汉济渭工程。结果表明:河道内生态需水过程具有波动性、季节性、时效性和区间性;在生态需水阈值区间内,下包线法同时满足维护河道生态和保证兴利效益的目的,可在较高生态需水标准基础上进一步压缩生态需水总量;下包线法和Tennant法中Tennant-好、Tennant-差所得生态需水过程分别为引汉济渭工程理想、适宜和最低生态需水过程。

关键词:河道内生态需水;变化范围法;生态需水阈值区间;下包线法;径流非一致性;引汉济渭
中图分类号:TV12 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)06-0168-07

Integrated calculation of ecological water demand of rivers based on RVA threshold interval and its application//
WU Lianzhou^{1,2}, BAI Tao³, HUANG Qiang³ (1. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on analysis and summary of the characteristics of ecological water demand of rivers, the lower envelope method based on the range of variability approach and results of multiple hydrological methods was proposed, and an evaluation system considering the accuracy of runoff data was established. A calculation framework of the ecological water demand of rivers considering the runoff inconsistency was constructed based on the consistency review and calculation and evaluation of the ecological water demand of rivers, and it was applied to the Hanjiang to Weihe River Water Diversion Project. The results show that the ecological water demand process of the river has the characteristics of volatility, seasonality, timeliness, and range; within the ecological water demand threshold interval, the lower envelope method can meet the requirements of maintaining river ecology and ensuring profitability, and it can further decrease the total ecological water demand with higher ecological water demand standards; the lower envelope method and the good and poor levels of the Tennant method can be used to obtain ideal, suitable, and minimum ecological water demand processes of the Hanjiang to Weihe River Water Diversion Project, respectively.

Key words: ecological water demand of rivers; range of variability approach; ecological water demand threshold interval; lower envelope method; runoff inconsistency; Hanjiang to Weihe River Water Diversion Project

气候变化和人类活动在不同程度上影响了水循环过程和在水资源分布^[1],造成部分流域灾害频发、河道断流、河道生态环境恶化。截至2021年,我国已建成约9.8万座水库,通过蓄水补枯改变了河道

基金项目:国家自然科学基金(52109035);中央高校基本科研业务费专项(2452021083)

作者简介:武连洲(1990—),男,副教授,博士,主要从事水库调度研究。E-mail:wulianzhou@nwfut.edu.cn

通信作者:白涛(1983—),男,副教授,博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail:baitao@xaut.edu.cn

天然径流时空分布,在带来巨大防洪、发电和供水等社会经济效益的同时,也使河道生态系统的结构和功能面临潜在威胁^[2-3]。研究显示生态调度可有效保障河道内生态系统用水要求,是“后坝工时代”流域生态修复和水资源利用的重要管理措施之一^[4]。因此,河道内生态需水过程作为水库调度模型的重要边界条件,其计算方法一直是水资源管理领域的基础问题之一^[5]。

目前,河道生态需水没有统一的定义和计算方法^[6]。在管理与应用层面,河道生态需水指河道生态需水量和需水流量;在需求对象层面,河道生态需水指河道内和河道外生态需水,其中,河道内生态需水在工程规划与运行中应用更广泛。近年来,国内外学者在河道内生态需水领域开展了大量的研究,研究方法主要包括水文分析法、水力学分析法、栖息地法和整体法,其中水文分析法对于计算资料要求相对较低,应用性更强^[7]。现阶段,研究人员从径流情势、生物习性和工程运行等方面进一步改进传统水文分析法,以提高结果的合理性和可行性。刘剑宇等^[8]采用概率分布函数拟合变异前日流量序列,确定概率密度最大处的流量为河道内生态流量,并应用于鄱阳湖流域。华祖林等^[9]提出了一种以河流形态、河道水生生物、水质和景观为要点的实用计算方法,从维持河流连通等4个维度,完善了高度人工化城市河流生态水位和生态流量确定方法。葛金金等^[10]采用5种水文学方法计算沙颍河的适宜生态流量,基于水量需求、水文节律和满足率3方面因素,推荐了季节性河流的适宜生态流量。龙凡等^[11]充分考虑河道径流规律,提出了以径流丰平枯条件概率为基础的流量历时曲线改进法。李栋楠等^[12]以澜沧江中下游3座水库(糯扎渡、景洪和橄榄坝水库)为例,建立了考虑发电目标和生态约束的梯级水库调度模型,定量分析了发电目标和生态流量约束之间的均衡关系,发现发电量增大会导致生态流量相对于自然过程的改变度增加。河道生态系统内生物的多样性导致生态需水过程的多样性,生态需水过程理应有一个阈值区间,而水库的实际运行又要求生态需水是确定过程,以保证可行性和可操作性。因此,如何充分利用水文分析法的优势,在阈值区间内获取合理的生态需水过程,仍缺乏相关的研究。

本文基于变化范围法(range of variability approach, RVA)生态需水阈值区间,集成了多种水文学法,提出了下包线法。整合了一致性审查、河道内生态需水计算和评价,构建了考虑径流非一致性的河道内生态需水计算框架,并应用于陕西省引汉

济渭跨流域调水工程。

1 河道内生态需水的特点

河道内生态需水通常指为保证河流生态系统健康、维持某一特定生态功能需要保持的特定流量^[13],主要具有以下特点:

a. 波动性。水生物种在演化过程中对于生存环境形成了规律性的期望需求,包括水质、流速、水温和流态等方面。以流量需求为例,若遭遇干旱或洪水,则大概率造成河道内生态系统破坏。

b. 季节性。流域气候和下垫面条件的季节性特征使得河道生态需水具有季节性。我国北方大部分河流处在干旱、半干旱和半湿润气候带,具有明显的季节性特征,因此应该根据水生植物和岸栖植物的生存所需,适时考虑径流季节性变化。

c. 时效性。水生物种的繁衍规律使得河道内生态需水具有时效性。在以往的生态调度研究中,鱼类通常是典型的河道内生态系统保护对象,处于食物链的顶端,其资源动态情况代表了河道内生态系统的完善和健康程度。以长江四大家鱼(青鱼、草鱼、鲢鱼、鳙鱼)为例,每年5—6月为洄游产卵时间段,为了创造适宜的水力环境和脉冲条件,必须保障洄游期具有持续的涨水条件。因此,应该充分结合水生物种繁衍所需,考虑相应保护物种在特定时间段的生态流量需求。

d. 区间性。生态系统中物种的多样性导致生态需水过程的多样性,若要同时满足上述波动性、季节性和时效性,则生态需水过程必然是区间过程。

2 河道内生态需水的计算方法

针对河道内生态需水的特点,本文提出了基于RVA生态需水阈值区间的下包线法,同时选取水文分析法中比较常用的Tennant法^[14]、年内展布法^[15]、Q90法^[16]、频率法^[17]计算生态需水过程,以期在保证生态基流的基础上进一步提高生态需水标准。

鉴于水库群间水力联系、运行模式、目标和社会需求等不同,大部分情况下水库兴利目标与河道生态系统保护目标相矛盾,不合理的蓄泄方案往往造成河道断流或者冲刷。因此,在水库调度计算中设置河道内生态需水标准时,应避免部分水库单纯追求兴利效益最大,仅仅保证最低生态系统需求的现象,而应尽可能提高生态标准,在合理的空间范围内提高河道生态保护效益。本文设置3种生态需水过程,即最小、适宜、理想河道内生态需水过程,分别对应保障河道内基本生态环境、提供适宜的生存环境、

最大化生态系统功能。

通常情况下,采用 RVA 法^[18]中月均流量等 33 个指标参数的 75% 和 25% 发生概率的值作为各指标的上、下限,即 RVA 阈值,有学者把月均流量参数的 50% 和 25% 发生概率的值作为河道内生态需水阈值区间的上、下限,认为阈值区间内的任何流量值都适宜河道生态系统健康发展。结合上述各水文学方法优缺点与相关标准规范,本文基于 RVA 法提出了集合多种水文学法计算成果的综合计算方法——下包线法,即在利用水文分析统计规律的基础上,综合对比多种方法取交集,在 RVA 阈值区间内提取确定性生态需水过程,作为水库调度模型的生态约束输入。主要步骤为:①确定各种方法计算的生态需水过程,利用 RVA 法确定生态需水阈值区间;②筛选 RVA 阈值区间与多种需水过程有交集的月份,对比分析后取下包线;③若无相交的生态需水过程,则取 RVA 生态需水阈值区间下限(一般取 25%)对应的点,完善下包线过程。

3 河道内生态需水计算结果评价体系

随着社会经济水平的发展,相应的水文监测实施制度日趋完善,然而由于各地发展水平参差不齐以及历史因素的影响,流域中部分区域的水文资料存在缺失、不完整的问题。因此,本文以资料的精度与翔实情况为切入点,通过河道内生态需水计算结果评价体系选择适宜于河道生态系统的需水过程。

3.1 生态需水过程评价方法的选择

a. 资料完善的情况下采用 RVA 法评价河道内生态需水过程和水文改变程度^[19]。RVA 法在河流生态水文变化指标体系的基础上,定量评估水文指标参数的改变程度,包括月均流量、年均极值、年极值出现时间、高低流量频率与历时、流量变化率与频率,共计 5 组 33 个水文指标。将所有计算的生态需水过程与生态需水阈值进行对比,观察其是否处于阈值区间,以确定生态需水过程的合理性。RVA 法优势明显,指标翔实,能系统地反映河道的生态健康程度。

b. 资料不完善、缺失的情况下采用 Tennant 法评价河道内生态需水过程^[20]。利用 Tennant 法将河流生态环境状况分为 8 个等级,将利用其他方法获得的流量过程与多年平均月径流进行反算,观察在现状生态需水条件下河道可能处于的生态环境等级。

3.2 生态需水计算结果评价指标

为了加强生态需水过程与水资源管理方面的联系,设定了以下统计指标定量评价生态需水计算

结果:

a. 生态供水年保证率 P_s 。河道内生态需水计算是为了更好地指导调度运营部门进行河道生态供水。在没有任何水库调节的情况下,以河流天然径流过程作为河道的生态供水, P_s 计算方法与常规的供水保证率相同。 P_s 值越大表示供水保证程度越高。

b. 生态供水破坏深度。以需水过程为基准,确定破坏深度值,主要包括最大破坏深度 $S_{\max}$ 和平均破坏深度 $\bar{S}$,其值越小表示供水满足度越高。

c. 生态供水缺水指数 I_e 。生态供水过程应尽可能与河道内生态需水过程相吻合,本文选用生态供水缺水指数描述生态供水过程与生态需水过程的波动情况,其值越小表示与河道内生态需水过程之间的吻合度越高,波动性越小,其计算公式为

$$I_e = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\frac{Q_{st} - Q_{dt}}{Q_{dt}} \right)^2 \quad (1)$$

式中: T 为运行总时段; Q_{st} 、 Q_{dt} 分别为 t 时段河道内生态供水流量和需水流量, m^3/s 。

d. 生态供水阈值区间保证率 P_{RVA} 。对于径流资料丰富的地区,计算获得 RVA 生态需水阈值区间,低于或者超过该区间的时段均不利于河道内水生生物的繁衍与生存,故被定义为破坏时段,其他时段被定义为适宜时段。在调度期内统计所有时段的生态供水过程,计算 P_{RVA} ,其值越高,表明河段处于适宜状态的时段越多,越有利于河道生态系统的和谐发展。 P_{RVA} 计算公式为

$$P_{\text{RVA}} = \frac{\sum_{t=1}^T f(q_{\text{edt}}, Q_{st}, q_{\text{eut}})}{T + 1} \quad (2)$$

$$\text{其中 } f(\cdot) = \begin{cases} 1 & q_{\text{edt}} \leq Q_{st} \leq q_{\text{eut}} \\ 0 & Q_{st} < q_{\text{edt}} \text{ 或 } Q_{st} > q_{\text{eut}} \end{cases}$$

式中: q_{eut} 、 q_{edt} 分别为 t 时段内 RVA 生态需水指标上、下限, m^3/s 。

4 考虑径流非一致性的河道内生态需水计算框架

4.1 径流非一致性诊断方法

气候变化和人类活动是影响流域水资源和水循环的两个驱动性因素,已成为当前研究热点问题之一。水文序列是一定时期内气候条件以及人类活动等综合作用的产物,受多种因素影响,随着时间的推移,流域内径流序列一致性也有可能遭到破坏,即径流序列可能发生变异^[21]。本文选取有序聚类法^[22]、累积距平法^[23]和 Mann-Kendall (M-K) 秩次检验法^[24]对径流序列进行非一致性诊断。

根据生物进化理论,生物在常年的进化过程中形成了相应的生存习性,对一致性破坏前径流过程的适应性和满意度更高。本文选用变异前的径流序列计算河道内生态需水过程,旨在通过合理的水库调度,尽可能在现状生存环境下还原水生生物生存所需的流量环境。

4.2 计算框架

结合一致性审查、河道内生态需水计算和评价,构建考虑径流非一致性的河道内生态需水计算框架,主要包括以下3步:①对径流序列进行一致性审查,若出现变异点,则将径流序列分为变异前和变异后两部分;②以河道内鱼类为保护对象,充分结合鱼类的洄游产卵期季节性特点,选取变异前径流序列计算河道内生态需水过程;③根据有无详尽资料,分别选用Tennant法和RVA法分析生态需水等级,采用评价指标定量描述相应生态需水过程的性能,分别推荐理想、最小和适宜的河道内生态需水过程。

5 实例应用

陕西省引汉济渭跨流域调水工程对缓解关中地区水资源短缺压力、改善渭河生态具有重要作用,到2030年年调水量平均可达15亿m³,可有效改善省内水资源分布与地区发展水平不匹配的局面^[25]。然而,大量水外调对水源区河道生态系统产生一定影响,合理的河道内生态需水过程有助于推进引汉济渭多目标调度实践。

5.1 径流一致性审查

本文分别对黄金峡水库和三河口水库入库径流序列(1954—2009年)进行一致性进行审查,结果如表1所示。由表1可知,黄金峡和三河口水库入库径流变异点均为1990年。根据之前的研究^[26],汉江上游和子午河流域的径流丰枯同步概率达到78%,二者水文变化规律基本一致,因此变异点一致的结果合理,同时,该结果与Chang等^[27]对汉江上游石泉—喜河—安康梯级电站联合调度的研究成果相符,结果可靠。

表1 入库径流一致性审查结果

Table 1 Consistency review results of runoff series

水 库	潜在变异点			认定 变异点
	累积距平法	有序聚类法	M-K 秩次检验法	
黄金峡	1964年、1979年、 1990年	1990年	1990年	1990年
三河口	1965年、1979年、 1990年	1990年	1970年、1989年、 1990年	1990年

5.2 河道内生态需水过程计算结果

汉江中上游鱼类资源丰富,据不完全统计共有

鱼类89种,分布天然鱼类产卵场10余处,鱼类从河道水位上涨(桃汛期)时开始产卵;3月上旬至4月中旬,鲤鱼开始产卵,清明前后达到高峰期;5—6月,细鳞鲴在黄金峡的长新滩、黄龙滩的急流险滩处开始产卵;6月下旬至7月上旬,四大家鱼从石泉水库逆流而上开始产卵^[28]。因此,本文设定汉江上游鱼类产卵和育幼期为每年3—7月,并尽可能增大该时间段内的河道生态流量,保障鱼类繁衍条件。

在Tennant法中选取Tennant-好(常规时期和鱼类产卵、育幼期的流量占比分别为20%和40%)和Tennant-差(常规时期和鱼类产卵、育幼期的流量占比均为10%)两个等级,加上工程设计流量过程、年内展布法、Q90法和频率法总计得到黄金峡水库下游河道6个生态需水过程,结果如图1所示。其中,在频率法计算时选取了Gamma分布、广义极值分布和对数正态分布拟合径流变量的概率密度函数,采用Kolmogorov-Smirnov检验分析分布可行性,采用均方根误差评价分布拟合优度,采用赤池信息准则确定出最优分布。

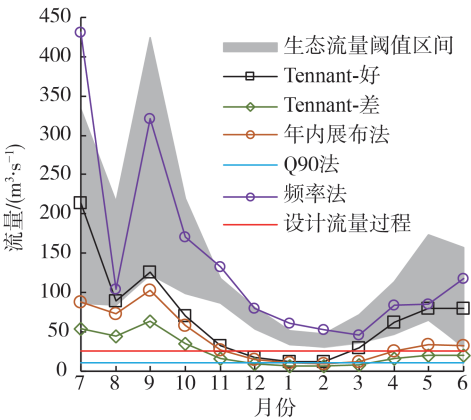


图1 黄金峡水库下游河道生态需水过程与RVA生态需水阈值区间

Fig.1 Ecological water demand process and RVA ecological water demand threshold interval in lower reaches of Huangjinxia Reservoir

5.3 河道内生态需水过程推荐结果

考虑洋县水文站和两河口水文站均具有符合条件的日径流资料,选择已有资料模式对河道内生态需水进行评价。结合RVA法研究成果,把年内各月平均流量指标可能发生的概率设定为25%和75%,以此作为河道内生态需水阈值区间,其中25%和75%分别对应阈值区间的下限和上限。

从图1可以看出,除了设计流量过程和Q90法的结果以外,其他4组生态需水过程的变化趋势基本一致,整体上汛期的生态需水高于非汛期;从12月至次年3月,生态需水过程设计值大于或者接近

Tennant-好、Tennant-差、年内展布法、Q90 法的结果; 6 组生态需水过程中, 频率法的结果中除了 7 月略高以外, 其他月份基本都在 RVA 生态需水阈值区间内, Tennant-好对应的生态需水过程在 7—9 月和 4—6 月处于 RVA 生态需水阈值区间内, 年内展布法的结果在 6—7 月处于 RVA 生态需水阈值区间内, 表明黄金峡水库下游河道内生态需水的计算标准相对偏低。

以 RVA 生态需水阈值区间为基础, 在区间内绘制 6 种调水过程的下包线, 即 6—7 月采用年内展布法计算, 8—9 月和 4—5 月选择 Tennant-好计算, 10 月至次年 3 月选用频率法计算, 综合以上 3 种方法, 汇总黄金峡水库下游河道内生态需水过程计算结果。

根据河道内生态需水计算评价体系中的指标设置, 假设在没有任何水利工程的情况下, 以天然来水为生态供水过程, 本文计算了包括下包线法在内的 7 组生态需水过程的评价指标, 结果如表 2 所示。

表 2 黄金峡水库下游河道内生态需水评价指标计算结果
Table 2 Results of ecological water demand evaluation indices in lower reaches of Huangjinxia Reservoir

生态需水过程来源	P_{RVA}	P_S	S_{max}	$\bar{S}$	I_e
Tennant-好	0.85	0.28	0.95	0.07	14.14
Tennant-差	0.97	0.67	0.81	0.01	106.60
年内展布法	0.93	0.47	0.89	0.03	35.97
Q90 法	0.99	0.84	0.64	0	1053.00
频率法	0.58	0.07	0.97	0.16	3.42
设计值	0.97	0.68	0.85	0.01	175.45
下包线法	0.68	0.12	0.92	0.10	14.10

a. 在生态供水阈值区间保证率、年保证率、最大破坏深度和平均破坏深度方面, Q90 法生态需水过程的指标最优, 但生态供水缺水指数最高, 表明在该情况下, 以“极限流量”维持河道内生态环境基本功能的目标比较容易满足, 但生态供水总量较少, 忽略了径流的天然水情变化规律。

b. 在生态供水缺水指数方面, 频率法性能最好, 表明该种模式更贴近天然径流的水情变化规律, 计算结果更适合水生生物的生存与繁衍。

c. 随着 Tennant 法中生态环境状况等级提升, 生态供水缺水指数显著减小, 表明水生生物的生存环境可进一步改善; Tennant-差的指标整体上优于 Q90 法和设计值, 尤其是生态供水缺水指数, 表明在生态需水总量差距不大的情况下, Tennant 法具有一定的优势。

d. 下包线法除了生态供水缺水指数指标相对较差以外, 其他指标均比频率法性能好, 这与较高的

生态需水标准有关, 进一步表明天然径流情况不一定适合生物繁衍生存, 有必要进行适当丰枯调节。

综上所述, 在满足 RVA 生态需水阈值基础上, 可进一步压缩生态需水量, 分别选取下包线法、Tennant-好和 Tennant-差获得的生态需水过程作为理想、适宜和最低生态需水过程。

与黄金峡水库下游河道内生态需水获取步骤相同, 可以获得三河口水库下游河道内理想、适宜和最低生态需水过程推荐结果(表 3)。

表 3 三河口水库下游河道内生态需水过程推荐结果
单位: m^3/s
Table 3 Recommended results of ecological water demand in lower reaches of Sanhekou Reservoir unit: m^3/s

月份	理想	适宜	最低	月份	理想	适宜	最低
7 月	30.5	22.4	7.6	1 月	5.4	1.0	0.5
8 月	22.2	11.4	5.7	2 月	9.2	0.9	0.4
9 月	22.6	14.2	7.1	3 月	4.3	2.9	0.7
10 月	14.6	8.2	4.1	4 月	8.3	7.8	1.9
11 月	9.6	3.1	1.5	5 月	17.8	11.6	2.9
12 月	6.3	1.5	0.7	6 月	16.7	11.9	2.9

6 结 论

a. 与其他方法相比, 下包线法获取的河道内生态需水过程在径流生态需水阈值区间内, 部分月份生态流量高于生态需水阈值下限, 可有效提高河道内生态需水标准; 充分利用生态需水阈值区间上限和下限, 结合多种水文学分析法的优势, 可有效避免生态需水量过大, 影响水利工程的兴利效益。

b. 考虑径流非一致性的河道内生态需水计算框架的应用可充分还原径流变异前水生物种所需的流量环境, 通过多指标评价, 推荐多种生态需水过程, 有助于生态调度方案的优化与决策。

c. 引汉济渭工程设计生态需水标准较低, 在后续的研究中可以选择理想、适宜和最低生态需水过程为切入点, 探讨工程调水与河道生态系统保障目标的潜力, 尝试在保证调水效益的基础上, 最大化维持水源区河道生态系统稳定。

参考文献:

[1] 苏布达, 孙赫敏, 李修仓, 等. 气候变化背景下中国陆地水循环时空演变[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 1096-1105. (SU Buda, SUN Hemin, LI Xiucang, et al. Impact of climate change on terrestrial water cycle in China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(6): 1096-1105. (in Chinese))

[2] 黄志鸿, 董增川, 周涛, 等. 面向生态友好的水库群调度模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 202-208. (HUANG Zhihong, DONG Zengchuan, ZHOU

- Tao, et al. Group operation model for ecological friendly reservoir [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(3): 202-208. (in Chinese))
- [3] 王浩, 王建华, 胡鹏. 水资源保护的新内涵: “量-质-域-流-生”协同保护和修复[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 1-9. (WANG Hao, WANG Jianhua, HU Peng. New connotation of water resources protection: “quantity-quality-domain-connectivity-biology” coordinated protection and restoration [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 1-9. (in Chinese))
- [4] 邓铭江, 黄强, 畅建霞, 等. 大尺度生态调度研究与实践[J]. 水利学报, 2020, 51(7): 757-773. (DENG Mingjiang, HUANG Qiang, CHANG Jianxia, et al. Large-scale ecological operation research and practice [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(7): 757-773. (in Chinese))
- [5] 黄强, 赵梦龙, 李瑛. 水库生态调度研究新进展[J]. 水力发电学报, 2017, 36(3): 1-11. (HUANG Qiang, ZHAO Menglong, LI Ying. Advancements in studies on reservoir ecological operation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(3): 1-11. (in Chinese))
- [6] 王中根, 赵玲玲, 陈庆伟, 等. 关于生态流量的概念解析[J]. 中国水利, 2020(15): 29-32. (WANG Zhonggen, ZHAO Lingling, CHEN Qingwei, et al. Analysis of the ecological flow concept [J]. China Water Resources, 2020(15): 29-32. (in Chinese))
- [7] 尚文绣, 彭少明, 王煜, 等. 面向河流生态完整性的黄河下游生态需水过程研究[J]. 水利学报, 2020, 51(3): 367-377. (SHANG Wenxiu, PENG Shaoming, WANG Yu, et al. Research on the ecological integrity-oriented environmental flow regime of the lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(3): 367-377. (in Chinese))
- [8] 刘剑宇, 张强, 顾西辉. 水文变异条件下鄱阳湖流域的生态流量[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5477-5485. (LIU Jianyu, ZHANG Qiang, GU Xihui. Evaluation of ecological flow with considerations of hydrological alterations in the Poyang Lake Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5477-5485. (in Chinese))
- [9] 华祖林, 董越洋, 褚克坚. 高度人工化城市河流生态水位和生态流量计算方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 140-144. (HUA Zulin, DONG Yueyang, CHU Kejian. Calculation method of ecological water level and discharge in highly artificial urban river [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 140-144. (in Chinese))
- [10] 葛金金, 彭文启, 张汶海, 等. 确定河道内适宜生态流量的几种水文学方法: 以沙颍河周口段为例[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 75-80. (GE Jinjin, PENG Wenqi, ZHANG Wenhai, et al. Comparison of several hydrological methods to determine the ecological flow for instream river: a case study of Zhoukou hydrological station in Shaying River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 75-80. (in Chinese))
- [11] 龙凡, 梅亚东. 基于概率加权 FDC 法的河流生态需水量计算[J]. 水文, 2017, 37(4): 1-5. (LONG Fan, MEI Yadong. Using probability-weighted FDC method to calculate basic river ecological flow [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(4): 1-5. (in Chinese))
- [12] 李栋楠, 赵建世. 梯级水库调度的发电-生态效益均衡分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(2): 39-46. (LI Dongnan, ZHAO Jianshi. Hydropower-ecologic benefits tradeoff analysis of cascade reservoir operation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(2): 39-46. (in Chinese))
- [13] 钟华平, 刘恒, 耿雷华, 等. 河道内生态需水估算方法及其评述[J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 430-434. (ZHONG Huaping, LIU Heng, GENG Leihua, et al. Review of assessment methods for instream ecological flow requirements [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(3): 430-434. (in Chinese))
- [14] 高玉琴, 刘钺, 赵晨程, 等. 南方季节性缺水河流逐月保证率设定法的改进[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 95-101. (GAO Yuqin, LIU Yue, ZHAO Chencheng, et al. Improvement on monthly guarantee rate setting method for seasonal water shortage rivers in south China [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 95-101. (in Chinese))
- [15] 潘扎荣, 阮晓红, 徐静. 河道基本生态需水的年内展布计算法[J]. 水利学报, 2013, 44(1): 119-126. (PAN Zharong, RUAN Xiaohong, XU Jing. A new calculation method of instream basic ecological water demand [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(1): 119-126. (in Chinese))
- [16] SMAKHTIM V, REVENGA C, DÖLL P. A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity [J]. Water International, 2004, 29(3): 307-317.
- [17] 李剑锋, 张强, 陈晓宏, 等. 考虑水文变异的黄河干流河道内生态需水研究[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 99-110. (LI Jianfeng, ZHANG Qiang, CHEN Xiaohong, et al. Study of ecological instream flow in Yellow River, considering the hydrological change [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 99-110. (in Chinese))
- [18] ZOLEZZI G, BELLIN A, BRUNO M C, et al. Assessing hydrological alterations at multiple temporal scales: Adige River, Italy [J]. Water Resources Research, 2009, 45(12): 69-76.
- [19] 黄显峰, 贾永乐, 方国华, 等. 基于 PP-RVA 法的水电站下游河流水文情势评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 479-485. (HUANG Xianfeng, JIA Yongle, FANG Guohua, et al. Hydrological regime evaluation of hydropower station downstream based on the

- PP-RVA method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(6):479-485. (in Chinese))
- [20] 金纯,姜翠玲,吴为. 基于水力水文学法的大渡河上游生态流量确定[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):8-14. (JIN Chun, JIANG Cuiling, WU Wei. Determination of ecological flow in upstream of Daduhe River based on hydraulic and hydrological methods [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (2):8-14. (in Chinese))
- [21] 武连洲,白涛,哈燕萍,等. 水文序列变异对水库调度运行的影响研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(4):88-92. (WU Lianzhou, BAI Tao, HA Yanping, et al. Effect of hydrological sequence variation on operation reservoir [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(4):88-92. (in Chinese))
- [22] 袁满,王文圣,叶瀚麟. 有序聚类分析法的改进及其在水文序列突变点识别中的应用[J]. 水文,2017,37(5):8-11. (YUAN Man, WANG Wensheng, YE Binlin. Improvement of sequential clustering method and its application to diagnose jump points of hydrological [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(5):8-11. (in Chinese))
- [23] 姜瑶,徐宗学,王静. 基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比[J]. 水利学报,2020,51(7):845-857. (JIANG Yao, XU Zongxue, WANG Jing. Comparison among five methods of trend detection for annual runoff series [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51 (7):845-857. (in Chinese))
- [24] 王赛男,李建鸿,蒲俊兵,等. 气候和人类活动对典型岩溶地下河系统径流年际变化的影响[J]. 自然资源学报,2019,34(4):759-770. (WANG Sainan, LI Jianhong, PU Junbing, et al. Impacts of climate change and human activities on the interannual flow changes in a typical karst subterranean river, South China [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(4):759-770. (in Chinese))
- [25] 杜小洲,白涛,马旭,等. 引汉济渭工程调水区水库群调水模式研究[J]. 水利水电技术,2017,48(8):2-7. (DU Xiaozhou, BAI Tao, MA Xu, et al. Study on water transfer mode of reservoir group within water-transferring region for Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(8):2-7. (in Chinese))
- [26] 马盼盼,白涛,武连洲,等. 汉江干支流径流丰枯遭遇对跨流域调水的影响[J]. 水利水电技术,2017,48(8):13-17. (MA Panpan, BAI Tao, WU Lianzhou, et al. Influence from wetness-dryness encounter of runoffs from tributaries and main stream of Hanjiang River on interbasin water transfer [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(8):13-17. (in Chinese))
- [27] CHANG J, WANG X, LI Y, et al. Hydropower plant operation rules optimization response to climate change [J]. Energy, 2018, 160:886-897.
- [28] 杨文杰. 汉江上游中段鱼类资源现状及保护对策[J]. 水生态学杂志,2002,22(1):40-41. (YANG Wenjie. Current status of fish resources and protection countermeasures in the middle section of the upper Hanjiang River [J]. Journal of Hydroecology, 2002, 22 (1):40-41. (in Chinese))

(收稿日期:2021-07-09 编辑:施业)

(上接第 167 页)

- [14] 陈晓静,李昆朋,李萍,等. 秦淮区北部水系引补水方案模拟[J]. 水利水电科技进展,2020,40(2):6-10. (CHEN Xiaojing, LI kunpeng, LI Ping, et al. Simulation study on water diversion scheme in northern river network of Qinhuai District [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2):6-10. (in Chinese))
- [15] 王文明,宋凤鸣,尹振文,等. 城市湿地景观水体富营养化评价、机理及治理[J]. 环境工程学报,2019,13(12):2898-2906. (WANG Wenming, SONG Fengming, YIN Zhenwen, et al. Evaluation, mechanism and treatment of landscape water eutrophication in city wetland [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13 (12):2898-2906. (in Chinese))
- [16] 吴普特,高学睿,卓拉,等. 过程水文学的方法框架与学科体系探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):1-7. (WU Pute, GAO Xuerui, ZHUO La, et al. Methodological framework and discipline system for process hydrology [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1):1-7. (in Chinese))
- [17] 张珮纶,王浩,雷晓辉,等. 湿地生态补水研究综述[J]. 人民黄河,2017,39(9):64-69. (ZHANG Peilun, WANG Hao, LEI Xiaohui, et al. A review of ecological water replenishment for wetlands [J]. Yellow River, 2017, 39(9):64-69. (in Chinese))
- [18] 王志鹏. 三江平原挠力河湿地群生态补水研究[D]. 大连:大连理工大学,2021.
- [19] XU Ye, WANG Yu, LI Sha, et al. Stochastic optimization model for water allocation on a watershed scale considering wetland's ecological water requirement [J]. Ecological Indicators, 2018, 92:330-341.
- [20] ALAFIFI A H, ROSENBERG D E. Systems modeling to improve river, riparian, and wetland habitat quality and area [J]. Environmental Modelling & Software, 2020, 126:104643.

(收稿日期:2022-03-21 编辑:施业)